

تحلیل ساختاری پوشش‌های الکترولس نیکل - فسفر عملیات پلاسمایی شده

کریم زنگنه مدار^۱، سید محمود منیرواقفی^۲

(۱) مجتمع مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

(۲) دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

پوشش‌های الکترولس نیکل-فسفر در شرایط عملیات حرارتی شده، از سختی و مقاومت سایشی نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشند. عملیات حرارتی متداول این پوشش‌ها (۱ ساعت در 400°C تحت اتمسفر خنثی) بیشتر موجب کریستاله شدن کامل آنها می‌گردد. در تحقیق حاضر پوشش‌های نیکل-فسفر علاوه بر عملیات حرارتی متداول، تحت عملیات پلاسمایی نیز واقع شدند. ضخامت پوشش‌ها ۵ و ۱۰ میکرون، دمای عملیات ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد و زمان آن ۱ و ۵ ساعت انتخاب شد. ضخامت، ساختار و ترکیب پوشش‌ها در دو حالت عملیات حرارتی شده (HT) و عملیات پلاسمایی شده (PT) از طریق آزمون‌های متالوگرافی، XRD و EDS مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضخامت پوشش‌ها و نیز شدت و پهنای متوسط پیک‌های حاصل از تفرق فازها در دو نوع پوشش، متفاوت است. این اختلاف‌ها به پدیده کندوپاش، رفتار استحاله‌ای و کرنش داخلی متفاوت پوشش‌ها نسبت داده شد. همچنین مشخص شد که تحت شرایط پلاسمایی، امکان کاهش فسفر و در نتیجه تغییر ترکیب شیمیایی پوشش وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: پوشش‌های نیکل-فسفر، عملیات پلاسمایی، استحاله فازی، کندوپاش، شدت تفرق.

Structural evaluation of plasma treated electroless Ni-P coatings

K.Zangeneh¹, S.M.Moonirvagefi²

1) Department of Materials Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran

2) Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

Abstract Heat treated electroless Ni-P coatings have high hardness and wear resistance. Traditional heat treatment (1 hr at 400°C under neutral atmosphere), results in full crystallization of electroless Ni-P coatings. In the present research, electroless Ni-P coatings were treated under conventional as well as plasma conditions. Coating thickness was 5 and 10 micron. Temperature rates and time of the processes were decided to be at 400°C and 600°C for 1 and 5 hours, respectively. Thickness, structure, and composition of the coatings were evaluated by optical microscopy, XRD and EDS methods in both heat treatment (HT) and plasma treatment (PT) conditions. It was shown that coating thickness as well as its XRD spectrum (i.e. intensity and breadth of peaks) was different. These disparities were related to sputtering phenomenon, special transformation behaviour, and residual strain in the plasma treated electroless Ni-P coatings. It was also found that chemical composition of the coatings could be altered during plasma process.

Keywords: Ni-P coating, Plasma treatment, Phase transformation, Sputtering, Diffraction intensity.

مقدمه

انجام عملیات ماسه پاشی، تمیزکاری و آماده سازی سطح، بر روی آنها پوشش نیکل- فسفر اعمال شد. فرآیند پوشش دهی در حمام صنعتی الکترولس نیکل با دمای حدود 90°C و pH حدود $4/6$ به مدت های ۱۰ و ۲۵ دقیقه صورت گرفت. برخی نمونه های پوشش داده شده، تحت عملیات حرارتی و برخی دیگر تحت عملیات پلاسمایی قرار گرفتند. عملیات حرارتی در یک کوره آزمایشگاهی تحت اتمسفر آرگون و عملیات پلاسمایی در یک کوره نیمه صنعتی تحت اتمسفر نیتروژن/آرگون (به نسبت ۳/۱)، در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد و زمان های ۱ و ۵ ساعت تحت فشار ۵-۱ mbar انجام شدند. جدول ۱ کد نمونه ها را با توجه به ضخامت پوشش ها و شرایط عملیات نشان می دهد.

برای تشخیص تغییرات ضخامت پوشش ها، از روش متالوگرافی با میکروسکوپ نوری استفاده شد. همچنین برای تشخیص تحولات ساختاری و مقایسه الگوی تفرق پوشش ها، از دستگاه تفرق اشعه ایکس فیلیپس مدل Pert-MPD^X با ولتاژ ۴۰ kV، جریان ۳۰ mA، سرعت رویش $0/1 \text{ s}^{-1}$ و تشعشع $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda=1/0542$) استفاده گردید. ترکیب شیمیایی پوشش ها نیز توسط سیستم EDS الحاقی به میکروسکپ الکترونی روبشی فیلیپس مدل XL۳۰ تعیین و با یکدیگر مقایسه شد.

نتایج و بحث

تأثیر عملیات پلاسمایی بر ضخامت پوشش ها

تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به سطح مقطع پوشش های ۵ و ۱۰ میکرون عملیات حرارتی شده و عملیات پلاسمایی شده در دمای 600°C به مدت ۵ ساعت، در شکل ۱ مورد مقایسه قرار گرفته اند. با وجود فصل مشترک غیر یکنواخت ناشی از ماسه پاشی سطح نمونه ها، کاهش نسبی ضخامت پوشش ها در اثر عملیات

متداول ترین روش بهبود خواص مکانیکی پوشش های نیکل- فسفر، عملیات حرارتی آنها می باشد. طی سال های اخیر به منظور توسعه فرآیندهای تکمیلی این پوشش ها، از عملیات آنیل نفوذی [۱]، لیزر [۲،۳] و کاشت یونی [۴،۵] نیز استفاده شده است. فرآیندهایی نظیر آنیل نفوذی و لیزر قادر به کریستاله کردن پوشش آمورف نیکل- فسفر و نیز نفوذ پوشش/زیرلایه در یکدیگر می باشند. عملیات کاشت یونی بدون ایجاد ناحیه نفوذی در فصل مشترک پوشش/زیرلایه، فقط باعث تغییر ترکیب نواحی سطحی پوشش می گردد.

علاوه بر فرآیندهای فوق، از عملیات پلاسمای نیز برای اصلاح خواص پوشش های نیکل- فسفر بهره گرفته شده است. بر اساس تحقیقات Wu و Li عملیات قوس پلاسمایی باعث ذوب فصل مشترک و نفوذ متقابل پوشش/زیرلایه و بنابراین افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه شده و از طرفی سختی پوشش را با ایجاد فازهای Ni_3P ، Ni_5P_4 و Ni_7P_3 در آن، افزایش می دهد [۶]. همچنین بر اساس بررسی های Wierzchon، Bielinski و Golanski، عملیات پلاسمایی پوشش های نیکل- فسفر در اتمسفر H_2/BCl_3 می تواند سختی و مقاومت سایشی این پوشش ها را تا حد زیادی افزایش دهد [۷،۸].

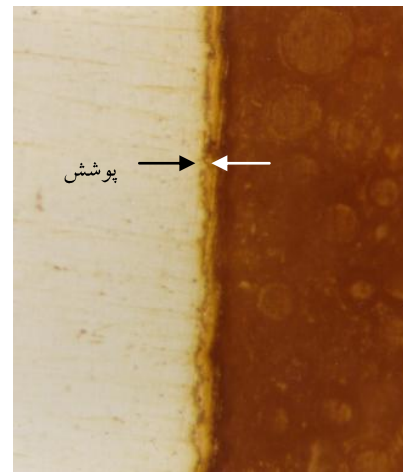
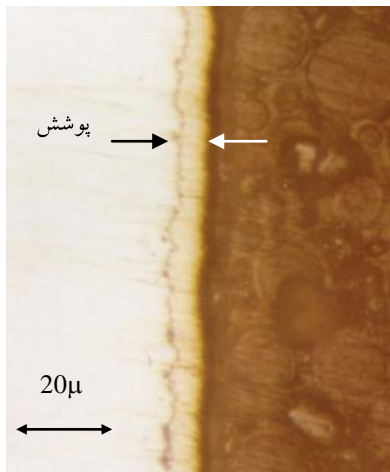
در تحقیق حاضر، پوشش های نیکل- فسفر تحت دو فرآیند عملیات حرارتی و عملیات پلاسمایی واقع شده و تحولات ساختاری در آنها مورد مقایسه قرار گرفته است. به منظور رعایت اختصار، این فرآیندها در متن مقاله به صورت HT و PT بیان شده اند.

روش تحقیق

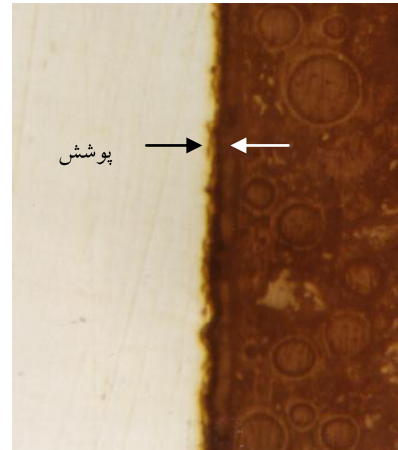
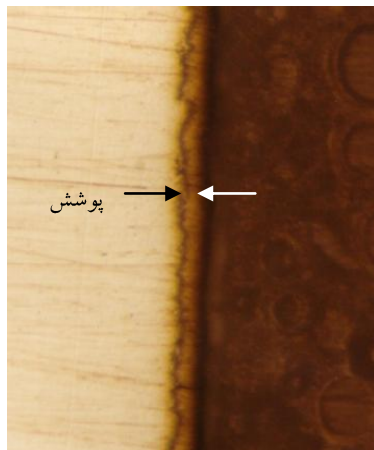
نمونه هایی از فولاد AISI۴۱۴۰ با ترکیب $0/28\% \text{Si}-1/1\% \text{Mn}-1/5\% \text{Cr}-0/4\% \text{Ni}-0/3\% \text{Mo}$ و $0/36\% \text{C}$ به قطر ۱۰mm و ضخامت ۳mm تهیه و پس از

جدول ۱: کد پوشش ها بر اساس ضخامت و شرایط عملیات آنها

شرایط عملیات		ضخامت پوشش (μm)	کد پوشش ها
زمان (hr)	درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$)		
۱	۴۰۰	۵	۵-۴۰۰/۱
۵			۵-۴۰۰/۵
۱	۶۰۰		۵-۶۰۰/۱
۵			۵-۶۰۰/۵
۱	۴۰۰	۱۰	۱۰-۴۰۰/۱
۵			۱۰-۴۰۰/۵
۱	۶۰۰		۱۰-۶۰۰/۱
۵			۱۰-۶۰۰/۵



الف



پوشش ۱۰ میکرون

ب

پوشش ۵ میکرون

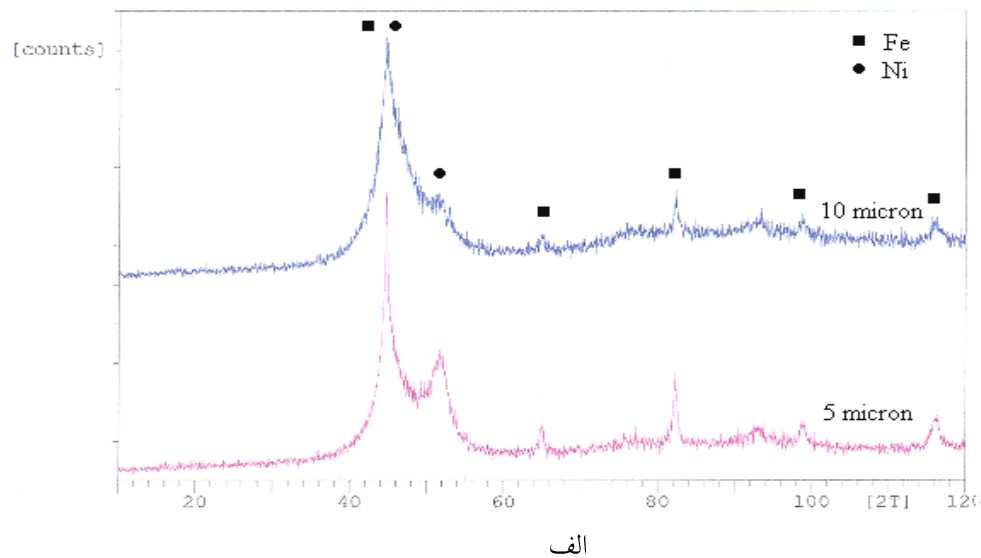
شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع پوشش های نیکل- فسفر؛

الف) عملیات حرارتی شده، ب) عملیات پلاسمایی شده.

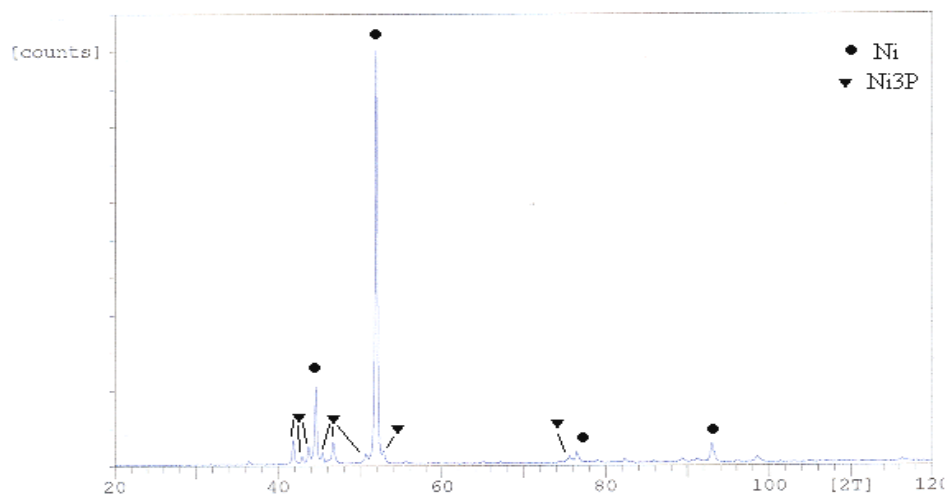
خام و عملیات شده نشان می دهد. الگوی تفرق پوشش های خام (شکل ۲ الف) شباهت زیادی با الگوی تفرق پوشش های متوسط و پر فسفر، حاصل از نتایج Keong و همکارانش دارد. آنها معتقدند که اینگونه الگوهای تفرق، مربوط به پوشش های حاوی مخلوطی از ساختار نیکل آمورف و میکروکریستالی می باشد [۹]. به دلیل ضخامت نسبتاً کم پوشش ها (۵-۱۰ میکرون)، پیک های آهن زیرلایه نیز در نمودار تفرق پوشش های خام

پلاسمایی به خوبی مشهود است. البته این کاهش ضخامت در تمامی سطح مقطع پوشش ها، یکنواخت نبوده و به همین علت نمی توان میزان کاهش ضخامت آن ها را به طور دقیق تعیین نمود. بررسی سطح مقطع پوشش های عملیات شده در دمای 400°C تفاوت قابل توجهی را میان پوشش های عملیات حرارتی و عملیات پلاسمایی شده، نشان نداده است.

تأثیر عملیات پلاسمایی بر شدت پیک های تفرق شکل ۲ نتایج آنالیز XRD پوشش ها را در دو حالت



الف



ب

شکل ۲: الگوی کلی تفرق اشعه حاصل از پوشش های نیکل-فسفر؛
الف) پوشش های خام، ب) پوشش های عملیات شده

جدول ۲: مجموع شدت کل فازها و شدت فازهای نیکل و Ni_3P برای پوشش های عملیات حرارتی شده (HT) و عملیات پلاسمایی شده (PT).

I_{total}		I_{Ni}		$I_{\text{Ni}_3\text{P}}$		شدت پیک ها کد پوشش ها
PT	HT	PT	HT	PT	HT	
۲۱۳۱۳	۲۰۸۲۰	۱۹۰۷۰	۱۸۶۰۰	۲۲۴۳	۲۲۲۰	۵-۴۰۰/۱
۲۰۷۸۳	۳۰۳۷۷	۱۸۷۲۰	۲۷۸۱۸	۲۰۶۳	۲۵۴۱	۵-۴۰۰/۵
۲۴۱۵۵	۵۷۵۹۵	۲۱۶۴۱	۵۳۲۴۶	۲۵۱۴	۴۳۴۸	۵-۶۰۰/۱
۵۴۱۱	۳۷۱۷۶	۳۶۴۷	۳۲۳۸۹	۱۷۶۴	۴۷۸۷	۵-۶۰۰/۵
۱۳۷۱۳	۱۲۷۷۲	۱۱۱۶۹	۱۰۲۱۶	۲۵۴۴	۲۵۵۶	۱۰-۴۰۰/۱
۱۶۶۲۷	۱۳۰۲۹	۱۳۸۲۵	۱۰۰۸۵	۲۸۰۲	۲۹۴۴	۱۰-۴۰۰/۵
۲۹۶۲۱	۲۴۳۰۲	۲۶۳۶۰	۱۹۹۰۴	۳۲۶۱	۴۳۹۸	۱۰-۶۰۰/۱
۳۰۹۷۶	۳۰۲۲۱	۲۷۵۷۸	۲۵۹۱۶	۳۳۹۸	۴۳۰۵	۱۰-۶۰۰/۵

ساعت در همان دما و یا دمای ۶۰۰°C ، افت قابل توجه شدت پیک ها (اعم از شدت کل و یا شدت هر فاز) را به دنبال داشته است. مقایسه شدت پیک ها برای پوشش ۵ میکرون به همراه نتایج متالوگرافی، مبین این واقعیت می-باشد که شرایط پلاسمای (بمباران سطح توسط یون های گازی) بسته به درجه حرارت و زمان عملیات، موجب کندوپاش نسبی پوشش و در نتیجه، کاهش ضخامت آن می-گردد. این پدیده توسط سایر محققین نیز گزارش گردیده است [۱۰].

برای پوشش ۱۰ میکرون، نتایج متفاوتی حاصل شده است. عملیات پلاسمایی، سبب افزایش قابل ملاحظه شدت فاز نیکل و کاهش نسبی شدت فاز Ni_3P گشته به نحوی که شدت کل پیک ها، نسبت به پوشش عملیات حرارتی شده، نه تنها کاهش نیافته (بر خلاف پوشش ۵ میکرون) بلکه نوعی افزایش هم نشان می دهد. قاعدتاً در این حالت نیز (مشابه آنچه که برای پوشش ۵ میکرون اشاره شد) اتمسفر پلاسمای باعث کندوپاش نسبی پوشش

ظاهر شده‌اند. در حالت عملیات شده، همه پوشش ها صرف نظر از نوع و شرایط عملیات، ساختاری متشکل از فازهای نیکل کریستالی و Ni_3P از خود نشان می دهند (شکل ۲ ب).

گرچه در حالت کلی، نمودارهای تفرق مربوط به همه پوشش های عملیات شده تقریباً یکسان است لیکن بررسی دقیق تر آنها، تفاوت هایی را آشکار می سازد. اطلاعات مربوط به شدت تفرق حاصل از پوشش های عملیات حرارتی شده (HT) در مقایسه با پوشش های عملیات پلاسمایی شده (PT)، برای دماها و زمان های مختلف عملیات، در جدول ۲ آورده شده اند. این اطلاعات شامل مجموع شدت کل پیک ها (I_{total}) و مجموع شدت پیک های هر فاز می باشد.

عملیات پلاسمایی پوشش ۵ میکرون به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۰۰°C ، در مقایسه با پوشش عملیات حرارتی شده، تغییر چندانی در شدت پیک ها ایجاد نکرده است (جدول ۳) در حالی که انجام این عملیات به مدت ۵

گشته اما با توجه به ضخامت کافی پوشش، هیچ گونه کاهشی در شدت کل پیک ها و شدت فاز نیکل مشاهده نمی شود. در نتیجه، افت شدت پیک های فاز Ni₃P در

جدول ۳: میزان تغییر در شدت فازها در پوشش های عملیات پلاسمایی شده

نسبت به پوشش های عملیات حرارتی شده (HT).

کد پوشش ها	$\Delta I_{Ni3P}/I_{Ni3P}^{HT}$ (%)	$\Delta I_{Ni}/I_{Ni}^{HT}$ (%)	$\Delta I_t/I_t^{HT}$ (%)
۵-۴۰۰/۱	۱	۲/۵	۲/۵
۵-۴۰۰/۵	-۱۸/۸	-۳۲/۷	-۳۲
۵-۶۰۰/۱	-۴۲/۲	-۵۹/۳	-۵۸
۵-۶۰۰/۵	-۶۳/۲	-۸۸/۷	-۸۵
۱۰-۴۰۰/۱	-۰/۵	۹/۳	۷/۴
۱۰-۴۰۰/۵	-۴/۸	۳۷/۱	۲۷/۶
۱۰-۶۰۰/۱	-۲۵/۹	۳۲/۴	۲۱/۹
۱۰-۶۰۰/۵	-۲۱	۶/۴	۲/۵

(به دلیل نازک شدن بیش از حد پوشش ۵ میکرون در اثر پدیده کندوپاش و بروز اثرات زیرلایه در نتایج، از اطلاعات آنالیز EDS این پوشش ها استفاده نشده است). به نظر می رسد کاهش میزان فسفر پوشش در همان مراحل اولیه عملیات پلاسمایی صورت گرفته باشد که علت آن را می توان به فشار بخار بالای فسفر و همچنین سهولت کندوپاش آن نسبت به خود پوشش (نیکل) نسبت داد. بر اساس نتایج مطالعات، انرژی لازم برای کندوپاش اتم های یک عنصر به عدد اتمی (یا جرم اتمی) و نیز به گرمای تصعید آن بستگی داشته و معمولاً با کاهش عدد اتمی و گرمای تصعید، کاهش می یابد [۱۱]. با توجه به اینکه انرژی لازم برای کندوپاش عنصر فسفر کمتر از نیکل بوده [۱۲] و از طرفی، گرمای تصعید فسفر (100 kJ.mole^{-1}) نیز کمتر از گرمای تصعید نیکل (430 kJ.mole^{-1}) می باشد، چنین انتظار می رود که

پوشش ۱۰ میکرون و بنابراین کاهش درصد این فاز در پوشش های عملیات پلاسمایی شده، در مقایسه با پوشش های عملیات حرارتی شده، نمی تواند به کندوپاش پوشش مربوط باشد و باید علت آن را در جای دیگری جستجو نمود.

تأثیر عملیات پلاسمایی بر ترکیب شیمیایی پوشش ها

به منظور رفع ابهام فوق و همچنین اطمینان از صحت اطلاعات حاصل از نتایج XRD و نیز جهت تعیین ترکیب شیمیایی پوشش های نیکل- فسفر، از آنالیز EDS بهره گرفته شد. بر اساس نتایج EDS مربوط به پوشش های با ضخامت ۱۰ میکرون، که در جدول ۴ آورده شده، میزان فسفر اولیه پوشش ها که حدود ۱۴-۱۰٪ بوده، گرچه در اثر عملیات حرارتی تغییر چندانی نکرده لیکن در اثر واقع شدن تحت اتمسفر پلاسمای، به ۹-۱۱٪ کاهش یافته است

جدول ۴: مقایسه درصد وزنی فسفر، حاصل از نتایج EDS

برای پوشش های ۱۰ میکرون عملیات حرارتی شده (HT) و عملیات پلاسمایی شده (PT).

کد پوشش ها	درصد فسفر پوشش ها ($\pm 1\%$)		درصد کاهش میزان فسفر در پوشش های PT نسبت به HT
	PT	HT	
۱۰-۴۰۰/۱	۹/۹	۱۰/۲	۳
۱۰-۴۰۰/۵	۱۰	۱۳/۱	۲۴
۱۰-۶۰۰/۱	۹/۹	۱۲/۳	۲۰
۱۰-۶۰۰/۵	۹/۲	۱۱/۶	۲۱

فسفر پوشش سریع تر از خود پوشش (نیکل) دچار کندوپاش شده و از پوشش خارج گردد.

مقایسه شدت پیک ها و ترکیب پوشش ها

چنانچه مقادیر درصد کاهش شدت فاز Ni_3P پوشش (حاصل از نتایج XRD در جدول ۳ برای پوشش ۱۰ میکرون) و مقادیر درصد کاهش میزان فسفر پوشش (حاصل از نتایج EDS در جدول ۴ برای پوشش ۱۰ میکرون) با یکدیگر مقایسه شوند، نتایج جالبی حاصل خواهد شد. تحت عملیات پلاسمایی، متوسط مقادیر کاهش درصد شدت فاز Ni_3P و کاهش درصد فسفر پوشش به ترتیب حدود ۱۳٪ و ۱۷٪ می باشد. با توجه به ضریب استوکیومتری فسفر در فاز Ni_3P ، قاعدتاً هرگونه کاهشی در میزان فسفر پوشش، بایستی موجب کاهش فاز Ni_3P به همان میزان در پوشش شود. بنابراین می توان اظهار داشت که عملیات پلاسمایی پوشش های نیکل-فسفر (به ضخامت ۱۰ میکرون) در مقایسه با عملیات حرارتی متداول، باعث کاهش میزان فسفر (یا درصد فاز Ni_3P) آنها به میزان حدود ۱۵٪ می گردد.

مراجعه مجدد به مندرجات جدول ۳ نشان می دهد که مجموع شدت پیک های فاز نیکل در پوشش های ۱۰ میکرون عملیات پلاسمایی شده، نسبت به پوشش های

عملیات حرارتی شده، به طور متوسط حدود ۲۰٪ بیشتر است. این موضوع می تواند ناشی از تفاوت میزان کریستاله شدن نیکل آمورف در حین دو عملیات فوق باشد.

اصولاً تحولات ساختاری پوشش های نیکل-فسفر در حین عملیات حرارتی شامل دو مرحله می باشد: تبدیل نیکل آمورف به کریستالی و تشکیل فازهای فسفید نیکل. بسیاری از محققین معتقدند که مراحل فوق به طور هم زمان رخ می دهند، بدین معنی که همراه با کریستاله شدن نیکل، ذرات فسفید نیکل نیز ایجاد می گردند. بر اساس نظر سایر محققین، در حین عملیات حرارتی پوشش های نیکل-فسفر، ابتدا کریستاله شدن نیکل به وقوع پیوسته و پس از مدتی، فازهای فسفید نیکل ایجاد می شوند [۹،۱۳،۱۴]. چنین استنباط می شود که عملیات پلاسمایی پوشش های نیکل-فسفر در تحقیق حاضر، بدون آنکه تأثیر زیادی بر سرعت تشکیل فاز Ni_3P داشته باشد، سبب تسریع در استحاله آمورف به کریستالی شده باشد.

جدول ۵ کاهش میزان فاز Ni_3P در پوشش های عملیات پلاسمایی شده را در مقایسه با پوشش های عملیات حرارتی شده، بر اساس نتایج XRD نشان می دهد. چنانچه در سطور قبل (با توجه به مقایسه نتایج XRD و EDS) اشاره شد، عملیات پلاسمایی می تواند منجر به کاهش میزان فاز Ni_3P در پوشش به میزان حدود ۱۵٪ (از طریق کاهش میزان فسفر) گردد. اما اطلاعات

مندرج در جدول ۵ مقادیر کاهش بیشتری را در میزان فاز Ni_3P (به طور متوسط ۲۵٪) نشان می دهند. این کاهش اضافی در میزان Ni_3P پوشش های عملیات پلاسمایی شده را می توان به تسریع در ایجاد نیکل کریستالی از ساختار آمورف و در نتیجه افزایش درصد نیکل کریستالی پوشش نسبت داد.

جدول ۵: مقایسه درصد فاز Ni_3P (محاسبه شده از نسبت شدت پیک ها در نتایج XRD) برای پوشش های ۱۰ میکرون عملیات حرارتی شده (HT) و عملیات پلاسمایی شده (PT).

درصد کاهش فاز Ni_3P در پوشش های PT نسبت به HT	% Ni_3P پوشش ها		کد پوشش ها
	PT	HT	
۷/۵	۱۸/۵	۲۰	۱۰-۴۰۰/۱
۲۵/۷	۱۶/۸	۲۲/۶	۱۰-۴۰۰/۵
۳۹/۲	۱۱	۱۸/۱	۱۰-۶۰۰/۱
۲۲/۵	۱۱	۱۴/۲	۱۰-۶۰۰/۵

فراتر از حد انحراف معیار می باشد، تفاوت عرض پیکها در نمودارهای تفرق را می توان به دو عامل، اندازه دانه های نیکل کریستالی و کرنش داخلی پوشش ها، نسبت داد. بر اساس رابطه زیر [۱۳]:

$$B = [(4e.tg \theta)^2 + (\lambda/d.Cos \theta)^2]^{1/2}$$

که در آن B پهنای پیک، e کرنش داخلی پوشش، d اندازه دانه نیکل، θ زاویه تفرق و λ طول موج اشعه می باشد، افزایش کرنش و یا کاهش اندازه دانه، سبب عریض تر شدن پیک های حاصل از تفرق می گردد.

تأثیر عملیات پلاسمایی بر عرض متوسط پیک های تفرق سایر اطلاعات حاصل از نتایج آنالیز XRD، شامل میانگین مجموع عرض کل پیک های مربوط به هر پوشش (Average Breadth) در جدول ۶ آورده شده است. پهنای متوسط پیک ها برای پوشش های عملیات پلاسمایی شده، حدود $0.09-0.1$ بیشتر از پوشش های عملیات حرارتی شده می باشد. بررسی نتایج تفرق چندین نمونه کاملاً یکسان در تحقیق حاضر نشان داده که انحراف معیار عرض متوسط کل پیک ها (σ) حدود ± 0.01 می باشد. با توجه به اینکه محدوده اختلاف مقادیر پهنای پیک ها،

جدول ۶: مقایسه متوسط مجموع عرض پیک ها ($B_{average}$) برای پوشش های عملیات حرارتی شده (HT) و عملیات پلاسمایی شده (PT).

ΔB	$B_{average}$		کد پوشش ها	ΔB	$B_{average}$		کد پوشش ها
	PT	HT			PT	HT	
۰	۰/۳۳	۰/۳۳	۱۰-۴۰۰/۱	۰/۰۲	۰/۲۹	۰/۲۷	۵-۴۰۰/۱
۰/۰۱	۰/۲۸	۰/۲۷	۱۰-۴۰۰/۵	۰/۰۴	۰/۲۶	۰/۲۲	۵-۴۰۰/۵
۰/۰۳	۰/۲۷	۰/۲۴	۱۰-۶۰۰/۱	۰/۰۷	۰/۲۸	۰/۲۱	۵-۶۰۰/۱
۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۲	۱۰-۶۰۰/۵	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۲۴	۵-۶۰۰/۵

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب امتنان خویش را از مسئولین محترم کوره نیتراسیون پلاسمایی شهرک علمی-تحقیقاتی اصفهان و سیستم SEM و XRD دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان به ترتیب آقایان مهندس دهاقین، مهندس صفریان و سرکار خانم مهندس صرامی ابراز می‌دارند.

مراجع

1. K. L. Lin & W.C. Chen, *The Interdiffusion and Interphases Formed Between Electroless Nickel Deposit and Steel Substrate*, Scrip. Metall. Mater, Vol.29(5) (1993)667-672.
2. A. Hugon, *Modification of the Properties of Electroless Nickel-Phosphorus Coatings by Laser Annealing or Melting*, The Min. Met. Mater. Soc.,(1989)71-81.
3. L. Renaud, *Surface Alloys Obtained on Mild Steel by Laser Treatment of Electroless Nickel Coatings*, Acta Metall. Mater., Vol.38,(8) (1990)1547-1553.
4. K. Hanamoto, *Annealing Effects on the Hardening of Electroless Plated Ni-P Layer by Boron Implantation*, Nuc. Instru. Meth. Phy. Res., Vol.B, 145(1998) 391-394.
5. J. I. Onate, *Nitrogen Implantation of Tool Steels and Engineering Coatings*,

بر اساس آنچه که قبلاً راجع به تأثیر شرایط عملیات پلاسمایی بر استحاله آمورف به کریستالی ذکر شد، تحت زمان یکسان عملیات، قاعده‌تاً بایستی اندازه دانه های نیکل در پوشش پلاسمای شده، نسبت به پوشش عملیات حرارتی شده، بزرگتر و یا هم اندازه باشد (به هرحال کوچکتر نخواهد بود). در نتیجه، پهن تر بودن پیک ها در پوشش های پلاسمای شده، بیشتر ناشی از وجود تنش یا کرنش داخلی بالاتر در آنها می باشد. البته تشخیص اینکه تنش داخلی در این پوشش ها از نوع کششی و یا فشاری باشد مشکل است ولی به دلیل ماهیت شرایط پلاسمای (بمباران سطح توسط یون های پر انرژی) و نیز امکان نفوذ نیتروژن موجود در اتمسفر پلاسمای به درون پوشش، انتظار می رود که این تنش ها از نوع فشاری باشند.

نتیجه گیری

با ارزیابی ساختار و تحلیل کمی و کیفی فازهای موجود در پوشش های نیکل- فسفر عملیات حرارتی شده تحت دو شرایط معمولی و پلاسمایی، نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- عملیات پلاسمایی سبب کندوپاش پوشش نیکل- فسفر می گردد. میزان این کندوپاش در دمای 600°C بیش از دمای 400°C می باشد.
- ۲- اتمسفر پلاسمای باعث کاهش میزان فسفر پوشش گشته و بنابراین درصد فاز Ni_3P ایجاد شده در پوشش را (حدود ۱۵٪) کاهش می دهد.
- ۳- تحت عملیات پلاسمایی، استحاله آمورف به کریستالی در پوشش های نیکل- فسفر، می تواند با سرعت بیشتری انجام پذیرد.
- ۴- با توجه به عریض تر بودن پیک های حاصل از تفرق در پوشش های پلاسمای شده، عملیات پلاسمایی موجب القای تنش پسماند فشاری در پوشش ها می گردد.

12. L. I. Maissel & R. Glang, *Handbook of Thin Film Technology*, McGraw-Hill Pub,(1970)3-23.
13. Z. Guo, K. G. Keong & W. Sha, Crystallisation and Phase Transformation Behaviour of Electroless Nickel Phosphorus Platings During Continuous Heating, *J. Alloys Comp*, Vol.358,(2003)112-119.
14. D. T. Gawne & U. Ma, *Structure and Wear Electroless Nickel Coatings*, *Mater. Sci. Tech*, Vol.3, (1987) 228-238.
6. Y. Wu & H. Li, *Solute Distribution and Phase Structure of Electroless Ni-P Alloy Layer by Plasma Remelting*, *Trans. Mater. Heat Treat. (China)*, Vol.22, (2)(2001)19-22.
7. T. Wierzchon & P. Bielinski, *Formation and Properties of Multicomponent and Composite Borided Layers on Steel*, *Sur. Coat. Tech*, Vol.73, (1995) 121-124.
8. D. Golanski, *Numerical Modeling of Residual Stresses in Boride Layers on Steel*, *Sur. Eng.*, Vol.13, (2)(1997) 145-148.
9. K. G. Keong, W. Sha & S. Malinov, *Hardness Evaluation of Electroless Nickel-Phosphorus Deposits With Thermal Processing*, *Sur. Coat. Tech.*, Vol.168, (2003) 263-274.
10. F. B. Wu, Y. I. Chen & P.J. Peng, *Fabrication, Thermal Stability and Microhardness of Sputtered Ni-P-W Coating*, *Sur. Coat. Tech.*, Vol.150, (2002) 232-238.
11. J. L. Vossen & W. Kern, *Thin Film Processes*, Academic Press, (1978) 513.